

САМООРГАНИЗАЦИЯ МАТЕРИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ

А. Я. УЧАЕВ, В. Т. ПУНИН, Н. И. СЕЛЬЧЕНКОВА



А. Я. Учаев



В. Т. Пунин



Н. И. Сельченкова

Самоорганизация материи — это самопроизвольное (не требующее внешних организующих воздействий) установление в неравновесных диссипативных средах устойчивых пространственно-временных структур.

Одним из интересных выводов в физике неравновесных состояний сложных систем (это могут быть молекулы, биологические системы, Вселенная) является открытие фундаментальных свойств конденсированных веществ в условиях сильного отклонения от равновесия. Сильно неравновесное состояние системы может стать причиной возникновения в ней нового типа состояний материи, называемых «диссипативными структурами», которые характеризуются временем жизни, областью локализации и фрактальной размерностью.

Разрушение твердого тела при внешнем воздействии в зависимости от времени воздействия происходит по-разному. Квазистатическое воздействие — при времени более 100 мкс, и динамическое воздействие, если это время менее 1 мкс.

Несколько лет назад в конференц-зале Саровской городской администрации прошла торжественная церемония вручения свидетельства на открытие «Универсальная закономерность поведения металлов в явлении динамического разрушения» (диплом № 296, 2003 г.), адресованное РФЯЦ-ВНИИЭФ Международной академией авторов научных открытий и изобретений. Глава города А. Г. Орлов вручил почетные дипломы Р. И. Илькаеву, В. Т. Пунину, С. А. Новикову, А. Я. Учаеву, Н. И. Сельченковой.

Практическое значение этого открытия состоит в том, что полученные результаты позволяют прогнозировать поведение материалов в экстремальных условиях (если это поведение еще не исследовано), компьютерным способом «конструировать» новые материалы, стойкие к определенным видам воздействия.

Еще в 1994 г. в журнале «Атом» № 1 в статье «Динамическое разрушение металлов при быстром объемном разогреве» мы рассказывали о разрушении металлов в режиме импульсного разогрева. Статья заканчивалась так: «Динамическое разрушение имеет, по-видимому, еще много загадок, и не исключено, что мы находимся в начальной стадии его изучения, но уже сейчас можно сказать, что в процессе накопления повреждаемости каскад центров разрушения растет как самоподобный геометрический объект для всех материалов, что говорит о едином подходе Природы к этому явлению».

Самоподобие (автомодельность) — это особая симметрия физической системы, которая состоит в том, что изменение масштабов независимых переменных может быть скомпенсировано подобным преобразованием других динамических переменных. Явления, развивающиеся во времени, будут автомодельными, если распределение их характеристик в различные моменты получается одно из другого путем преобразования подобия.

Результаты дальнейших исследований показали универсальность признаков поведения металлов в процессе динамического разрушения, которые обусловлены самоорганизацией и неустойчивостями в диссипативных структурах (например, в структуре каскадов центров разрушения), лежащих в основе сопротивления тела внешнему воздействию.

Показано, что динамические деструктивные процессы в конденсированных средах на различных масштабно-временных уровнях носят кооперативный характер. Это обусловлено фрактальной природой ансамблей диссипативных структур, создающихся в результате высокоинтенсивного воздействия, возникновением связности в системе центров разрушения, переходом неравновесной системы с одного масштабного уровня, подчиняющегося концентрационному критерию, на другой.

Почему происходит самоорганизация? В открытых нелинейных системах, примером которых и являются металлы в процессе динамического разрушения, при малых деформациях неупорядоченность в системе резко возрастает за счет интенсивного размножения дислокаций. Но затем, при увеличении плотности по-

глощенной энергии, энтропия системы начинает уменьшаться за счет структурообразования. Например, самоорганизация дислокаций в полосы скольжения кристаллической решетки происходит, когда внутренние силы взаимодействия между дислокациями превосходят силы внешнего воздействия.

С увеличением плотности дислокаций силами внешнего воздействия уменьшаются междислокационные расстояния, что приводит к росту внутренних сил междислокационного взаимодействия. При некотором критическом значении плотности дислокаций внутренние силы могут превышать внешние. Отсюда следует, что эффекты самоорганизации носят пороговый характер. Среда становится нелинейной.

Центры разрушения (дислокации) — это кавитационные поры, возникающие в металлах при динамическом разрушении. Плотность этих центров играет роль сжимаемости, т. е. восприимчивости. Следовательно, процесс динамического разрушения необходимо рассматривать как критическое явление. К количественному описанию этого процесса — потери связности тела или возникновению связности в системе центров разрушения и, как следствие, макро-разрушения — применим математический аппарат теории перколяции или магнитных фазовых переходов. Критические явления по своей природе обусловлены всей совокупностью частиц, а не их индивидуальными свойствами, т. е. являются масштабно-вариантными.

В металлах процесс динамического разрушения можно вызвать, например, воздействием импульсов релятивистских электронных пучков с плотностью поглощенной энергии до 1 кДж/г и длительностью импульса порядка 1 нс или импульсного лазерного излучения с плотностью мощности 10^{13} Вт/см² и длительностью импульса порядка 10 пс.

Ранее было показано (ДАН, 2003 г., т. 393, № 3, с. 326–331), что временные закономерности процесса динамического разрушения металлов в диапазоне долговечности менее 1 мкс обусловлены иерархическими свойствами диссипативных структур — каскада центров разрушения. Формирование диссипативных структур возможно только при совместной реализации нескольких структурных уровней, для которых фрактальная размерность является количественной характеристикой структуры.

Нами было также показано (ДАН, 2002 г., т. 384, № 3, с. 328–333), что ансамбль диссипативных структур, как и каскад полос скольже-

ния кристаллической решетки, каскад центров разрушения являются фрактальными кластерами, а на пороге макро-разрушения каскад центров разрушения является перколяционным кластером. Это позволило установить аналитический вид функции плотности центров разрушения и скорости центрообразования.

При высокоинтенсивном импульсном воздействии поведение металлов и количественные характеристики возникающих на наномасштабном уровне диссипативных структур определяют поведение металлов на макромасштабном уровне. Следовательно, уравнения гидродинамики, основанные на принципе непрерывности, неприменимы для описания быстропротекающих неравновесных процессов, описания скачков давления, температуры.

Нами было установлено, что термодинамический потенциал (энтальпия H) является параметром, который контролирует процесс динамического разрушения. Отношение энтальпии H к теплоте фазового перехода L является инвариантом поведения металлов с различным порядковым номером периодической таблицы по отношению к внешним воздействиям.

На основе установленных температурно-временных закономерностей (частных для каждого металла) получены данные о границе разрушения для каждого металла в диапазоне долговечности 10^{-6} – 10^{-10} с, в координатах долговечности t — первый динамический инвариант I_1 , (рис. 1). Здесь $I_1 = p/\Gamma\rho(H+L)$, p — давление, приводящее к разрушению, ρ — плотность, Γ — параметр Грюнайзена. Зона разрушения — выше границы. Данные по воздействию лазерного излучения отмечены индексом ЛИ, остальные — для воздействия релятивистских электронных

пучков. Из рисунка видно, что критические плотности поглощенной энергии, приводящие к разрушению разных металлов при разных воздействиях, согласуются.

Представление процесса деформации и разрушения нагруженных систем (образцов) на различных временных и масштабных уровнях при

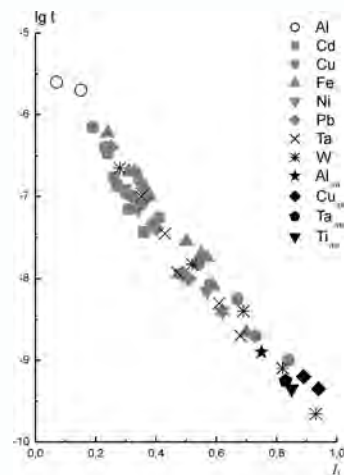


Рис. 1

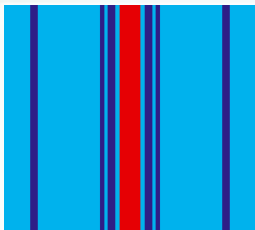


Рис. 2

различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия как пространственно-временной эволюции иерархически организованной системы позволяет описать разрушение в рамках единой концепции.

Чтобы прогнозировать поведение элементов узлов и конструкций, необходимо знать количественные характеристики реакции системы (конструкции) на различных масштабных уровнях в различные моменты времени действия внешней нагрузки. Единый механизм процесса динамического разрушения металлов — потеря связности системы (образца) путем кластеризации каскада центров разрушения, единый параметр порядка и одинаковая размерность пространства, в котором протекает процесс, определяет возможность прогнозирования в экстремальных условиях.

Все это определяет универсальное поведение металлов и обуславливает масштабно-инвариантные свойства поведения структур на различных временных интервалах при различных амплитудно-временных характеристиках внешнего воздействия. Открывается возможность моделирования таких процессов в лабораторных условиях при масштабировании времени импульсного воздействия (но это время должно быть меньше времени акустической разгрузки нагруженной области изучаемого объекта). Могут исследоваться малые объекты с использованием малогабаритных локализирующих камер, что упрощает эксперимент.

Применимость иерархической модели процесса динамического разрушения определена тем, что в ней учтены количественные характеристики отклика системы на высокоинтенсивное внешнее воздействие и установлены кинетические скейлинговые соотношения. Кинетические переменные — плотность центров разрушения и скорость их образования введены нами в расчетную модель разрушения, которая внедрена в двумерные математические коды ТИМ-2В на регулярных и нерегулярных Лагранжевых сетках.

Для проверки предложенной иерархической модели мы провели ряд экспериментов с разными металлами при различных способах нагружения.



Рис. 3

Исследовалось нагружение клиновидных образцов из сплава урана с добавкой 1,5 % (данные коллег из ВНИИТФ) молибдена скользящей детонационной волной, распространяющейся в слое ВВ, помещенном на одну из поверхностей клина. Результаты показали, что кинетические модели прочности верно передают картину зарождения и развития откольных разрушений, позволяют определять причину возникающих отколов при воздействии растягивающих напряжений.

Экспериментально исследовалось механическое воздействие релятивистских электронных пучков на тонкие образцы меди различной толщины. Результаты численного моделирования этого воздействия при толщине образца 0,13 мм и поглощенной энергии 74 кал/г показаны на рис. 2. Изображено поперечное сечение образца, синий цвет — области сплошности, красный — область разрушения. Здесь время разрушения $2 \cdot 10^{-8}$ с, скорость деформации $2,7 \cdot 10^8$ с $^{-1}$.

Аналогичные опыты с медными образцами были проведены с нагружением лазерным импульсом длительностью $\sim 10^{-12}$ с. На рис. 3 приведены результаты численного моделирования для момента разрушения ($\sim 10^{-9}$ с) для образца толщиной $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мм. Здесь синий цвет — область разрушения, красный — область сплошности.

Результаты численного моделирования для таких опытов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В заключение можно сказать, что экспериментально обнаружено и теоретически обосновано неизвестное ранее явление универсального поведения металлов при динамическом разрушении (в широком диапазоне долговечности 10^{-6} – 10^{-10} с), обусловленное критическим поведением диссипативных структур, лежащих в основе сопротивления тела внешнему воздействию, имеющих иерархическую соподчиненность от наномасштабов до масштабов разрушаемого тела.

УЧАЕВ Александр Яковлевич —

главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук

ПУНИН Валерий Тихонович —

главный научный сотрудник – советник при дирекции РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, лауреат Государственной премии и премии Правительства РФ

СЕЛЬЧЕНКОВА Надежда Ивановна —

ведущий научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук